

İçten Yanmalı Motorların Termal Bariyer Kaplanması

Thermal Barrier Coating of Internal Combustion Engines

Denizhan **Taşdıvar***,
Doç. Dr. Z. Engin **Erkmen**
Marmara Üniversitesi , Metalurji-Malzeme Müh. Bölümü, Göztepe

Denizhan **Taşdıvar***,
Assoc. Prof. Dr. Z. Engin **Erkmen**
Marmara University, Metallurgy-Materials Eng. Dept., Göztepe

Özet

Bu çalışmada önce okuyucuyu bilgilendirmek ve ilgisini uyandırmak gayesiyle günlük hayatta etkileşim içinde olduğumuz belli başlı içten yanmalı motorların (benzinli motor, diesel motoru, uçak motoru v.b.) çalışma prensipleri kısaca özetlenmiştir. İkinci aşamada motorların verimliliğini arttırmak için uygulanan seramik kaplamaların nitelikleri, ısı dağılımı ve performans özelliklerinden özetle bahsedilmiştir. Üçüncü aşamada seramik kaplama yöntemleri tanıtılmıştır. Son olarak sanayi ve fakültemiz de gerçekleştirilen kaplama işlemi ve mikroyapı karakterizasyonu ele alınmış ve kaplamaların uygulanmasında dikkat edilecek kriterler ve sağlanacak avantajlar da özetlenmiştir.

1. Giriş

İçten yanmalı motorlar, içinde bulunan yanma odasında oluşan yanma (patlama) olayı ile çalışan ısı motorlarıdır. Silindire giren yakıtın yanması, silindir içindeki sıcaklığı ve gaz basıncını yükselterek gazların genişlemesini sağlar. Gazların genişlemesi, pistonların, türbin bıçaklarının (palelerin) ya da motorun hareketi için kullanılır. Yanma odasında bir oksitleyici gaz ile birleşebilen herhangi bir yakıtla çalışabilirler. Örnek olarak; benzin, LPG, diesel, hidrojen vb. İçten yanmalı motorların en önemli kullanım alanı mobil sistemlerdir; çünkü yüksek güç/ağırlık oranı aynı zamanda yakıt verimliliği sağlamaktadır. Arabalarda, motorsikletlerde, uçaklarda ve lokomotiflerde kullanılan motorlar içten yanmalı

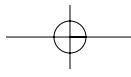
* Son sınıf öğrencisi
* Senior student

Abstract

In this study, the operating principles of main internal combustion engines we interact with in daily life (gasoline engine, diesel engine, aircraft engine, etc.) were briefly summarized to inform and awaken the attention of the reader. In the second phase, characteristics, heat distribution and performance qualities of ceramic coatings applied to increase the efficiency of engines are briefly discussed. In the third phase, ceramic coating methods are introduced. Lastly, the coating process used in the industry and our faculty and micro structure characterization are addressed an criteria to be considered in application of coatings and advantages to be derived are summarized.

1. Preamble

Internal combustion engines are heat engines which run based on the combustion (blast) phenomenon occurring in the combustion chamber inside them. The combustion of the fuel entering the cylinder allows the expansion of gases by raising the temperature and gas pressure inside the cylinder. Expansion of gases is used to move pistons, turbine blades or engines. They may run on any fuel which may combine with a reducing gas in the combustion chamber. For example, gasoline, LPG, diesel, hydrogen, etc. The most important field of application of internal combustion engines is mobile systems because the high power/mass ratio also results in fuel efficien-



motorlardır. Jet uçakları, helikopterler ve büyük gemiler gibi çok yüksek güç isteyen araçlarda da gaz türbini olarak kullanılmaktadır.

Motor parçaları, motorun çeşidine göre değişmektedir. Dört zamanlı motorlarda, önemli parçalar krank mili (mor), bir veya daha fazla kam mili ve süpaplardır (kırmızı ve mavi). İki zamanlı motorlarda süpap sistemi yerine sadece egzost çıkışı, yakıt girişi vardır. Heriki tip motorda da, bir ya da iki silindir (gri ve yeşil) ve her silindir için bir buji (koyu gri), bir piston (sarı) ve bir krank mili bulunur (Şekil 1).

2. İçten Yanmalı Motorların Sınıflandırılması

2.1. Benzinli Motor

Bu motorlar, dört zamanlı ve iki zamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Dört zamanlı motorlarda, silindir dışında hazırlanan benzin-hava karışımı, silindirde 8/1 ve 12/1 aralığında sıkıştırılır (en zengin ve en seyreltik karışım) (1. zaman). Sıkıştırma sonunda sıcaklık ve basıncı artan



Şekil 1: İçten Yanmalı Motorun Kesiti¹
Figure 1: Cross-Section of Internal Combustion Engine¹

karışım, buji tırnaklarında oluşturulan bir kıvılcım sayesinde tutuşturulur. Yanma ile artan basınç kuvveti, pistonu iterek iş meydana getirir (2. zaman). Açılan atım süpabından (3. zaman), egzoz gazlarının dışarıya atılıp, emme süpabından silindire taze karışımın dolmasıyla (4. zaman), aynı çevirim tekrarlanır. İki zamanlı benzin motorunda, silindirlerin doldurulması ve dolgunun sıkıştırılması bir seferde, genişleme ve egzost atımı ise ikinci bir seferde oluşmaktadır^{2,3} (Benzin motorunun dört zamanlı

çalışması hakkında demo bilgi için <http://auto.howstuff-works.com/engine.htm> adresine bakınız).

2.2. Diesel Motoru

Diesel Motorları 1892 yılında Rudolf Diesel tarafından icat edilmiş ve patenti alınmıştır. Bu motorlarda, silindire alınan hava, piston tarafından 15/1 ila 24/1 oranında sıkıştırılarak sıcaklık ve basınç artırılır. Sıcaklık ve basıncı artan hava içerisine diesel yakıtı püskürtülerek, yakıtın benzinli motordan farklı olarak kendi kendine tutuşup yanması sağlanır. Havanın silindire alınıp egzozun dışarı atılması, dört zamanlı benzin motorlarına benzer. Hava-yakıt karışımının kalitesi ayarlanarak hızlandırılan veya yüklenen diesel motorları, benzin motorlarına göre daha yüksek bir verime sahiptirler. Diesel yakıtı benzine göre daha koyu bir petrol ürünüdür, ayrıca diesel motorları daha yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde çalıştırdıklarından, benzin motorlarına göre genelde daha ağırdırlar^{2,4}.

cy. Engines used in cars, motorcycles, aircraft and locomotives are internal combustion engines. They are used as gas turbines in vehicles which require very high power like get planes, helicopters and large vessels, too.

Engine components vary by the type of the engine. In four-stroke engines, important components are the crankshaft (purple), camshaft (red and blue) and valves. Two-stroke engines have exhaust outlet, fuel inlet and valve systems. There is one or two cylinders (gray and green), a spark plug for each cylinder (dark gray), a piston (yellow) and a crankshaft are found in both types of engines (Picture 1).

2. Classification of Internal Combustion Engines

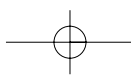
1. Gasoline Engine

These engines are categorized into two classes as four-stroke and two-stroke. In four-stroke engines, the gasoline-air mixture prepared outside the cylinder is compressed in 8/1 and 12/1 range in the cylinder (richest and most dilute mixture) (Stroke 1). The mixture, the temperature and pressure of which increases due to compression, is ignited because of a spark created in spark plug lugs. The compression force increasing due to combustion creates work pushing the piston (Stroke 2). From the opened exhaust valve (third stroke), exhaust gases are discharged and a fresh mixture is filled into the cylinder through the suction valve (Stroke 4) and the cycle is

repeated. In the two-stroke gasoline engine, filling of the cylinders and compression of the fill occurs in one process and expansion and exhaust discharge occur next time^{2,3} (For demo info on four-stroke operation of gasoline motor, see <http://auto.howstuff-works.com/engine.htm>.)

2. Diesel Engine

Diesel engines were invented and patented by Rudolf Diesel in 1892. In these engines, the air taken into the cylinder is compressed at the ratio of 15/1 and 24/1 by the piston, increasing the temperature and pressure. Diesel fuel is sprayed into the air, temperature and pressure are increased, allowing the fuel to self-ignite in contrast to the



(Diesel motorları hakkında detaylı bilgi ve demo programlara (<http://auto.howstuffworks.com/diesel.htm>, http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine#Types_of_diesel_engines <http://www.shermanlab.com/xmwang/myGUI/DieselG.html>) linklerinden ulaşılabilir.

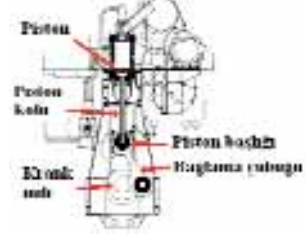
2.3. Döner Pistonlu Motorlar (Wankel Motorları)

Döner pistonlu motor, oval, ortası kalın sekiz şeklinde bir gövde ile bu gövde içerisinde eksantrik olarak dönen üç köşeli üçgenel bir rotordan ibarettir. Rotor bir iç ve bir dış dişli yardımıyla, motor ana miline bağlıdır. Bu motorlarda emme, sıkıştırma, iş ve egzoz atımı dört zaman içinde rotorun etrafında çevrimsel şekilde oluşmaktadır. Motorun rotoru ve oval yanma odası aynı eksende yer aldığından, Wankel motorları, diğer motorlara göre % 48 oranında daha az parça bulundurur ve diğer



Şekil 2: a. 2.7 lt. Direk Püskürtmeli Diesel Motoru (CRD)
Figure 2: a. 2.7 lt. Direct Injection Diesel Engine (CRD)

motorlara göre daha az hacime ve ağırlığa sahiptirler. Bu motorlar Alman bilim adamı Felix Wankel tarafından 1956 yılında geliştirilmiş olup türünün en başarılı örneğidir. Avantajları, daha çevreci oluşu, yüksek süratlere ulaşabilmesi, dezavantajı ise düşük hızlarda torkunun az olması ve buna bağlı olarak fazla yakıt tüketmesi şeklinde sıralanabilir. (Demo için bkz <http://www.keveney.com/Wankel.html>⁵)



b. Dünyanın en büyük Diesel Motoru olarak kabul edilen ve tankerlerde kullanılan RTA96 C nin Kesiti⁴
b. Cross-section of RTA96 C regarded as the largest diesel engine in the world which is used in tankers⁴

Wankel motorunun çalışması okla gösterilen dört bölge için özetlenebilir (Şekil 3):
a. Rotasyon sırasında yakıt/hava karışımının giriş ağzına aktarılması,
b. Karışımın sıkıştırılması,
c. Karışımın bir buji vasıtasıyla yakılması ve dönme için gereken itme kuvvetinin sağlanması,
d. Egzost gazının atılması.

2.4. Gaz Türbinleri

Bu motorlarda kompresör tarafından sıkıştırılan hava

gasoline engine. Intake of air into the cylinder and discharge of exhaust is similar to four-stroke gasoline engines. Diesel engines accelerated or loaded by changing the quality of air/fuel mixture have a higher efficiency than gasoline engines. Diesel fuel is a heavier petroleum product compared to gasoline. Furthermore, since diesel engines run at higher temperatures and pressures, they are usually heavier overall than gasoline engines^{2,4} (For detailed info and demo programs on diesel engines, see (<http://auto.howstuffworks.com/diesel.htm>, http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine#Types_of_diesel_engines <http://www.shermanlab.com/xmwang/myGUI/DieselG.html>).

3. Wankel Engines

(Demo için bkz <http://www.keveney.com/Wankel.html> 5)
The Wankel engine is composed of an oval body, the middle part of which is in the form of a broad eight figure and a triangular rotor rotating eccentrically within this body. The rotor is connected to the main shaft of the engine with the aid of an internal and an external gear. In these engines, suction compression work and exhaust discharge occurs in cycles around the rotor in four strokes. Since the rotor and the oval combustion chamber of the engine lie on the same axis, Wankel engines have 18 % less parts compared to other engines and have a smaller

volume and weight compared to others. This engine was developed by German scientist Felix Wankel in 1956 and is the most successful specimen of its type. Its pluses are its being more environment-friendly, its capability to achieve high speeds and its minuses are that its torque is small at low speeds and therefore, it consumes more fuel. (For demo see <http://www.keveney.com/Wankel.html>⁵)

The running of the Wankel engine may be summarized for four areas shown by arrows (Figure 3):
a. Transfer of fuel/air mixture to inlet opening during rotation,
b. Compression of the mix-

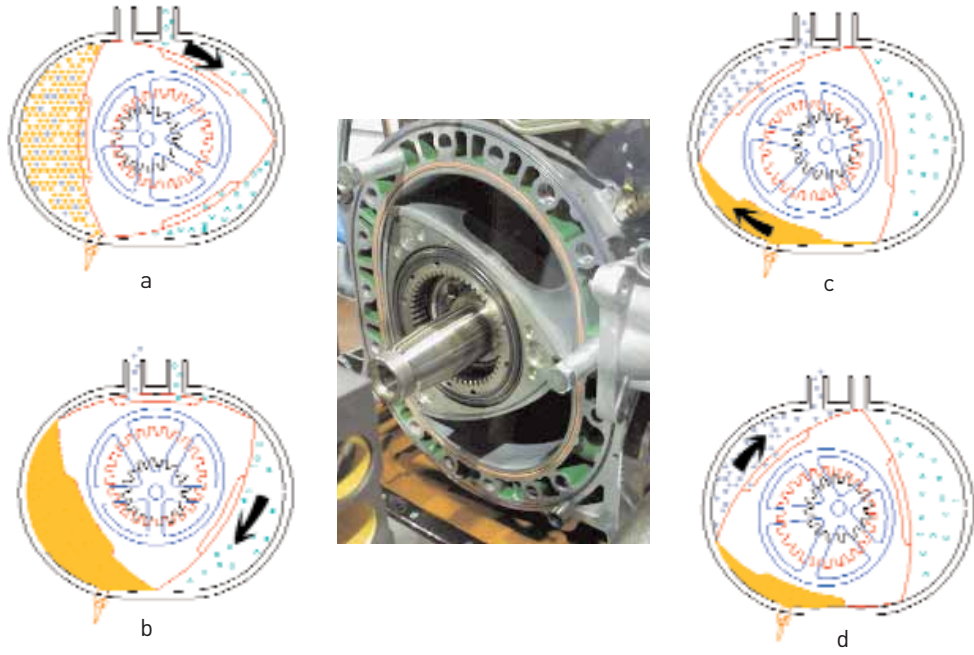
içerisinde püskürtülen yakıt (benzin, gaz yağı, diesel yakıtı veya fuel-oil), başlangıçta bir defaya mahsus olmak üzere ateşlenir sonra devamlı bir yanma elde edilir. Tahrikle dönen rotor, ön taraftan havayı içe dönük paleler (bıçaklar) sayesinde emer ve sıkıştırır, sıkışan hava, daralan yanma odasında yakıtla karışarak daha çok sıkışır ve sıcaklığı hızla artarak patlar ve motorun arka kısmından tepki ile çıkar; çıkış sırasında rotorun arka palelerine çarparak onun dönmesini ve tekrar ön taraftan havanın emilip sıkıştırılmasını sağlar. Rotor birbiri içine geçmiş herbiri bağımsız dönen shaftlardan oluşmuştur⁶ (Şekil 4). (Demo bilgi için: <http://science.howstuffworks.com/turbine3.htm>)

3. İçten Yanmalı Motorların Seramik Kaplanması ve Performans Arttırılması

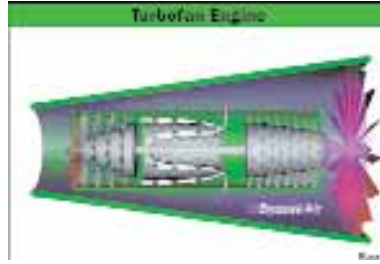
Bir içten yanmalı motorun performansını arttırmak, üretilen iş ve ısı enerjisinin büyük bir yüzdesinin faydalı enerji olarak kullanılmasını sağlamaktır. İçten yanmalı motorlarda iş üreten enerji toplam enerjinin, %30-40'ı civarında olup, geri kalan enerjinin %60-70'i ise motor parçalarını yüksek sıcaklıktan koruma amacıyla yapılmış olan soğutma sistemi ve 500-600 °C sıcaklıktaki egzost gazları tarafından atmosfere atılmaktadır⁷.

Motorlarda ve gaz türbinlerinde ısı kayıplarını azaltmak amacıyla yanma odası seramik bir tabaka ile kaplanabilir. Bu şekilde, düşük ısı iletim özelliğine sahip seramik malzemelerin fiziksel, termal ve kimyasal özellikleri günümüzün teknolojik imkanlarıyla istenen şartlara yaklaştırılarak geniş bir alanda kullanım imkanı hedeflenir⁷.

Düşük ısı kayıplı motorlar veya diğer bir ifadeyle dış ortamdaki yalıtılmış Adyabatik Motorların gerçekleştirilmesi Termal Bariyer Kaplama (TBC) ile sağlanır. Kaplama teknolojisi, 1975 li yıllardan itibaren diesel



Şekil 3: Wankel Motoru ve Çalışma Prensipleri⁵
Figure 3: Wankel Engine and Its Operation Principles⁵



Şekil 4: Turbofan Uçak Motoru⁶
Figure 4: Turbofan Aircraft Engine⁶

ture,
c. Combustion of the mixture with the aid of a spark plug and procuring the necessary thrust force for rotation.
d. Discharge of exhaust gas.

4. Gas Turbines

In these engines, the fuel (gasoline, gas oil, diesel fuel or fuel-oil) injected inside the air compressed by a compressor is ignited for one time at the beginning and subsequently, a continuous combustion is derived. The driven rotor sucks and compresses the air from the front, using inward looking blades and compressed air is further compressed in the narrowing down combustion chamber mixing with fuel and blasts with increasing temperature and is discharged from the rear of the engine due to reaction. During exit, it hits the rear blades of the rotor, causing it to rotate and causing the air to be sucked in and compressed from the front once again. The rotor is composed of concentric shafts, each rotating independently (Figure 4). (For demo info: <http://science.howstuffworks.com/turbine3.htm>)

3. Coating of Internal Combustion Engines with Ceramic and Enhancement of Performance

Increasing of the performance of an internal combustion engine is allowing a major percentage of the generated work and heat energy to be used as beneficial energy. In internal combustion engines, work generating energy is about 30-40 % of the total energy with 60-70 % of the remaining energy being released to the atmosphere by the cooling system built to protect engine parts against high temperature and the exhaust gases at a temperature of 500-600 °C⁷.

In engines and gas turbines, the combustion chamber is lined with a ceramic layer to reduce heat losses. Hence, it is targeted that the physical, thermal and chemical properties of ceramic materials which have low heat transfer property are brought close to desired requirements with the aid of technological capabilities of our day, allowing them to be used in a broad field of application⁷.

Attainment of low heat loss engines

Bilim - Teknoloji / Science - Technology

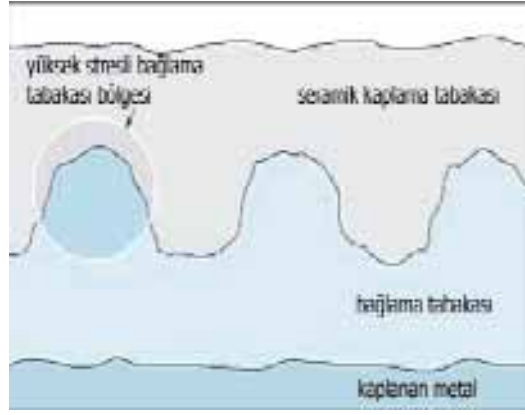
Temmuz-Ağustos / July-August 2006/ No.16

motorlarının yanma odası elemanlarında metal yüzey üzerine seramik kaplama uygulanmasıyla gelişmiştir. Isı kaybını azaltarak motorda verimi arttırmak amacıyla; yanma odasının, silindir kapağının ve subapların termal bariyer kaplanması aynı zamanda soğutma sistemini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Soğutma sistemi elemanlarının (vantilatör, su kanalları, pompa, radyatör vb.) kademeli olarak azalması sayesinde ağırlık, parça maliyeti ve ekonomisi yanısıra % 40 oranında da yakıt tasarrufu sağlanacağı düşünülmektedir³. Ayrıca motor veriminin % 6-12 arasında arttığı hesaplanmaktadır. Buna bağlı olarak ABD de yıllık uçak yakıtı tasarrufu \$250000'a yaklaşmaktadır.

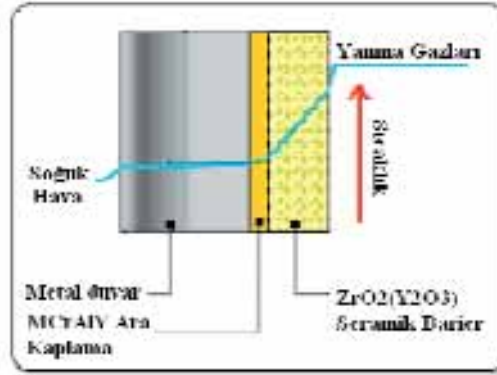
Bir Termal Bariyer Sistemi, kaplanacak malzeme, seramik kaplama ve aralarında bulunan bağlayıcı tabakadan oluşmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan malzeme % 6-8 yttria ile stabilize edilmiş zirkonya seramiğidir. Bağlayıcı tabakada kullanılan alaşımın formülü genellikle MCrAlX 'dir. Formülde yer alan M için Ni, Co ya da Fe; X için de Y, Zr, Hf ya da Yb elementleri kullanılabilir. Şekil 7 a günümüzde motor yanma odalarında uygulanan seramik kaplamaların kesit şemasını göstermektedir^{8,9,10}.

Kaplama kalınlıkları birkaç mikron mertebesinde yüzlerce mikrona (600-700 mm) kadar ulaşabilir. Kaplama kalınlığını ve üretim şeklini, kaplanacak malzemenin kendi özellikleri ve kullanım koşulları belirler. Bir türbin bıçağı üzerine kaplanan seramik malzeme ve metal üzerindeki ısı dağılımı şematik olarak Şekil 7 b de verilmektedir¹⁰.

Termal bariyer kaplamaların en önemli fiziksel özelliği termal iletkenliğidir. Yapılan araştırmalarla termal iletkenlik düşürülmeye çalışılmaktadır; çünkü termal iletkenlik arttıkça termal yalıtım özellik-



Şekil 7 a: Termal Bariyer Kaplama Sistemi
Figure 7 a Thermal Barrier Coating System



b. Kaplama Ara Kaplama ve Metal üzerindeki ısı dağılımı¹⁰
b. Heat Distribution on Coating, Binder and Metal¹⁰

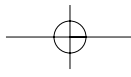
or in other words, Adiabatic Engines insulated from external environment is achieved by thermal coating (TBC). The coating technology was developed by ceramic coating application on metal surfaces in the combustion chamber elements of diesel engines, starting from 1975s. Coating of the combustion chamber, cylinder cap and valves by thermal barrier to enhance efficiency in the engine reducing heat loss, also seeks to eliminate the cooling system. It is believed that by stepped elimination of cooling system elements (fan, water tubes, pump, radiator, etc.) will lead to about 40 % fuel saving in addition to economy of weight and part costs. It is also calculated that engine efficiency will increase by 6-12 %. Related annual aircraft fuel saving in USA is approaching \$250,000.

A Thermal Barrier System is composed of the material to be coated, ceramic coating and the bonding layer between them. The material mostly used for this purpose is zirconia ceramic stabilized with 6-8

yttria. The formula of the alloy used in the bonding layer is generally MCrAlX. For the M in the formula; Ni, Co or Fe and for X, the elements Y, Zr, Hf or Yb may be used. Figure 7 a gives the cross-section of ceramic coatings applied in engine combustion chambers today^{8,9,10}.

Coating thicknesses may vary from the order of just a few microns up to hundreds of microns (600-700 mm). The thickness and method of production of the coating depends on the properties of the material to be coated itself and usage conditions. The heat distribution on ceramic material coated over a turbine blade and the metal is given in Figure 7 b¹⁰.

The most important physical characteristic of thermal barrier coatings is thermal conductivity. Efforts are made to reduce thermal conductivity by conducted research because as thermal conductivity increases, thermal insulation properties drop and the oxidation rate of the binding



leri düşmekte ve bağlayıcı tabakanın oksitlenme oranı artmaktadır. Diğer önemli özellikler ise, seramik kaplama, bağlama tabakası ve kaplanacak malzemenin genleşme katsayılarıdır. Genleşme katsayılarının birbirine yakın olması yüksek sıcaklık çalışma ortamında oluşabilecek hataları engellemek için önemlidir. Aksi takdirde arayüzeylerde sıcaklık artış ve azalışlarında biriken gerilmelerden dolayı çatlamlar, bozulmalar gözlenebilir. Bu özelliklere ilave olarak kaplama malzemesi taneli ve boşluklu bir yapıya sahip olmalıdır; çünkü yeterli boşluk ve tane malzemenin termal iletkenliğini düşürür. Son olarak kaplamanın yüksek sıcaklıkta çalışan türbin bıçaklarına çok iyi yapışması gerekir. Oluşacak bir hata metal bıçağın aniden yüksek sıcaklığa çıkmasına dolayısıyla bıçakta korozyon oluşmasına ya da erimeye sebep olabilir.

4.Kaplama Metodları

Uçak türbin palelerinin homojen olarak kaplanması PVD (Physical Vapor Deposition) fiziksel buhar biriktirme yöntemi veya APS (Arc Plasma Püskürtme), plazma sprey yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Birinci yöntemde kaplama malzemesinden yapılmış silindirik bir külçe bir elektron demetiyle buharlaştırılmakta ve parça yüzeyine temas eden buharlaşmış kaplama malzemesi yoğunlaşarak homojen bir şekilde yüzeyi kaplamaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı minimal yüzeysel şekil değişimlerini tolere edebilen bir yapıya sahip olmasıdır; buna bağlı olarak kaplama yüzeyinin sifıra yaklaşan elastik modülü kaplamanın yüksek uçuş sürelerinde yorulma direncinin artmasında rol oynamaktadır. Bu tür kaplamaların diğer avantajları hem pürüzlü hem de düzgün yüzeylere mükemmel ölçüde tutunma kabiliyetine sahip olmasıdır. Aynı zamanda kaplanmış

yüzeyin düzgün olmasından dolayı yüzey işlemlerine gerek kalmaz ve buharlaştırma yöntemi, bıçaklar üzerindeki iğne başı büyüklüğündeki delikleri tıkamaz.

APS yönteminde, kaplanacak seramik malzeme akıcı bir toz halinde olup plazma tabancasına besleme yapılır. Çok yüksek plazma sıcaklıklarında eriyen seramik tozu, yüksek basınç altında taşıyıcı inert gazlarla yüksek süratle metal yüzeyine çarpması sonucu kaplama gerçekleştirilir. Kaplama morfolojisi hücresel bir yapıya sahip olup PVD tekniğinden oldukça farklıdır: kesit mikroyapısı lameller bir görüntü verir, boşluk oranı daha fazla olup çatlaklar da görülebilir. Bu yapıya bağlı olarak ikinci tür kaplamaların daha iyi ısı yalıtım özellikleri vardır. Buna karşılık mukavemetleri PVD kaplamalara göre daha düşük olup, kullanım ömürleri daha sınırlıdır ve onarılabilmek şansları da yoktur. APS yöntemi farklı şekillerde gerçekleştirilebilir, sıcaklık,

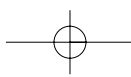
layer increases. Other important characteristics are the expansion coefficients of the ceramic coating, the binding layer and the material to be coated. It is important for preventing any errors which may occur in high temperature operational environment that expansion coefficients are close to each other. Otherwise, cracks may occur in middle surfaces due to stresses accumulating in temperature increases and decreases. In addition to these properties, the coating material must have a grained structure with voids because sufficient voids and grains drop the thermal conductivity of the material. Lastly, the coating must adhere thoroughly to the turbine blades operating at high temperature. Any error may lead to the metals reaching a high temperature suddenly, leading to corrosion or melting on the blade.

4.Coating Methods

Homogeneous coating of aircraft turbine blades is carried out by either PVD (Physical Vapor Deposition) or APS (Arc Plasma Spraying) methods. In the first method, a cylindrical mass made of the coating material is vaporized using an electron beam and the vaporized coating material coming into contact with the surface of the part is condensed covering the surface in a homogeneous manner. The most important advantage of this method is that it has a structure which can tolerate minimal surface form changes. Also, the modulus of elasticity of the coating surface, which is close to zero, helps increasing the fatigue strength of the coating in high flight times. Other advantages of these types of coatings are their ability to adhere perfectly both to rough and also smooth surfaces. At the same time, since the coated surface is smooth, there is no need for surface

processes and the vaporization method does not clog pinhole size holes on the blades.

In the APS method, the ceramic material to be coated is in the form of a fluid powder and it is fed to a plasma gun. The ceramic powder, which melts at very high plasma temperatures, hits the surface of the metal at high speed with carrier inert gases under pressure, allowing coating to be achieved. The coating morphology has a cellular structure and it is quite different from that of the PVD technique. Cross-section microstructure has a lamellar look; the ratio of voids is higher and cracks may be observed. Due to this structure, these second type of coatings have better heat insulation properties. Yet, their strengths are lower than PVD coatings and their lives are more limited with no chance to be repaired. The APS technique may be achieved in different ways. Temperature,



püskürtme hızı ve farklı morfolojik özellikler Tablo 1 de özetlenmektedir¹⁰. APS yöntemiyle seramik, metal veya polimer malzemeler kaplanabilir. Tablo 2 de endüstride en sık kullanılan yttria takviyeli zirkonya $ZrO_2 (Y_2O_3)$ kaplamanın bazı fiziksel özellikleri verilmektedir.

5. Örnek Deneysel Çalışma

Bölümümüzde, bir diesel motorunun silindir gömleği düzgün bir biçimde SiC diskle kesilmiş, daha sonra kumlama işlemine tabi tutulmuş ve bu sayede yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. (Şekil 8 a,c). Elde edilen iki parçadan bir tanesi Kobatek firmasında %8 yttria ile takviye edilmiş zirkonya tozu kullanılarak direk olarak plazma sprej yöntemiyle kaplanmıştır (Şekil 8 b). Diğer numune yüzeyinde, ayrıca bağlama tabakası oluşturmak için NiCrAlY (AMDRY 962) tozu ilaveten kullanılmıştır. Daha sonra parçalar, kesme, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiş, Jeol LV-5900 cihazı kullanılarak mikroyapı görüntüleri alınmış (Şekil 8 d,e,f) ve Instron Universal Tester sertlik cihazı kullanılarak sertlikleri ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 8 ve Tablo 3'te verilmektedir.

spray speed and various morphological properties are summarized in Table 1¹⁰. Ceramic, metal or polymer materials may be coated by the APS method. Table 2 gives certain physical properties of the yttria reinforced zirconia $ZrO_2 (Y_2O_3)$ coating which is most commonly used in the industry.

5. Model Test Study

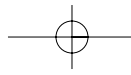
In our department, the cylinder sleeve of a diesel engine was cut smoothly using a SiC disc, then it was sanded; thus increasing surface hardness (Figure 8 a,c). One of the two pieces obtained was coated directly by plasma spray technique using zirconia powder reinforced with 8 % yttria in the firm Kobatek (Figure 8 b). On the surface of the other specimen, NiCrAlY (AMDRY 962) powder was used additionally to create a further binding layer. Subsequently, the pieces went under cutting, emery and polishing processes and their microstructure images were obtained using Jeol LV-5900 device (Figure 8 d,e,f) and their hardness was measured using Instron Universal Tester hardness device. Test results are given in Figure 8 and Table 3.

6. Results and Discussion

Tablo 1: Farklı APS Yöntemlerinin Basit bir Karşılaştırması¹⁰

Table 1: A Simple Comparison of Various APS Methods¹⁰

Yöntem Method	Çalışma sıcaklığı (°C) Operating Temp. (°C)	Akış debisi (g/min) Flow Rate (g/min)	Kaplama özelliği Coating Property
Yanma Combustion	3000	40-100	Boşluk ve oksitlenme Voids and oxidization
Yüksek hızlı oxy-yakıt tabancası High speed oxy-fuel gun	3000	400-800	Yoğun, iyi tutunma ve basma gerilmeleri Dense, good adherence and compressive stresses
İkili ark tabancası Dual arc gun	3000-6000	50-150	Yoğun ve kalın Dense and thick
Plazma tabancası Plasma gun	5000-25000	80-300	Gözenekli seramik kaplama Porous ceramic coating
Soğuk spreyleme Cold spraying	Oda sıcaklığı Room temperature	400-800	Yoğun, basma gerilmeleri Dense, compressive stresses



Tablo 2: Kaplama Malzemesi ve Bağlama Tabakasının başlıca Fiziksel Özellikleri¹⁰
Table 2: Main Physical Properties of Coating Material and Binding Layer¹⁰

Kaplama Malzemesi ve Özelliği Coating Material and Its Properties	Değerler Values
TBC [ZrO₂ (Y₂O₃)]	
Termal Genleşme Katsayısı, α (C ⁻¹) x10 ⁶ Thermal Expansion Coefficient α (C ⁻¹) x10 ⁶	11
Elastik Modül, E (Gpa) Modulus of Elasticity E (Gpa)	0-100
Bağlama tabakası Binding Layer	
Termal Genleşme Katsayısı, α (C ⁻¹) x10 ⁶ Thermal Expansion Coefficient, α (C ⁻¹) x10 ⁶	13-16
Elastik Modül, E (Gpa) Modulus of Elasticity, E (Gpa)	200
Akma dayanımı (oda sıcaklığı) σ_y (Mpa) Yield Strength (room temperature) σ_y (Mpa)	300-600 300-600

Şekil 8 Deneysel Çalışmalar/Figure 8 Test studies:



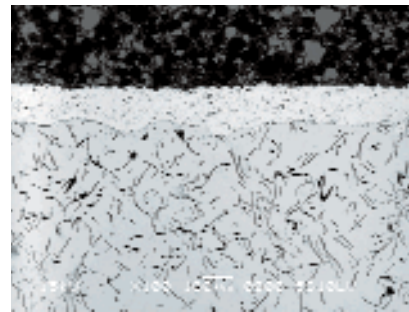
Şekil 8 a: Diesel Silindir Gömleği
Figure 8 a: Diesel Cylinder Sleeve



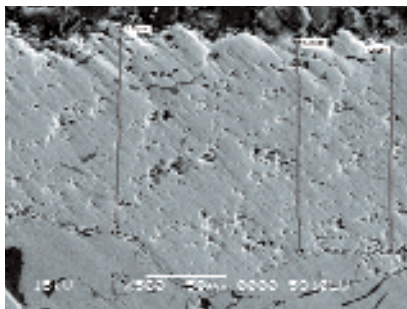
Şekil 8 b: Plazma Sprey Yöntemi
Figure 8 b: Plasma Spray Method



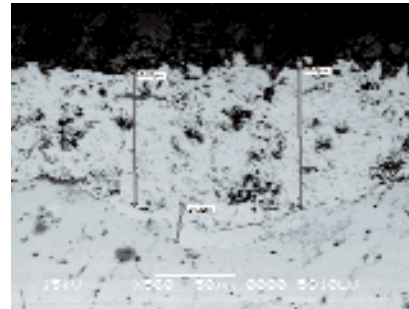
Şekil 8 c. Silindir Gömleğinden Kesilmiş Örnekler
Figure 8 c. Specimens Cut out of Cylinder Sleeve



Şekil 8 d: Gri Dökme Demir ve Kaplama Mikroyapısı
Figure 8 d: Gray Cast Iron and Coating Microstructure



Şekil 8 e: Kaplama Mikroyapısı (arabağlayıcısız)
Figure 8 e: Coating Microstructure (with no binder)



Şekil 8 f: Kaplama Mikroyapısı (arabağlayıcıtlı)
Figure 8 f: Coating Microstructure (with binder)

6.Sonuçlar ve İrdeleme

Şekil 8 a ve c, silindir gömleğini ve üst kısmından kesilen parçaları göstermektedir. Parçalar mengene kullanılarak sabitlendikten sonra Şekil 8 b de görüldüğü gibi plazma sprey yöntemiyle kaplanmışlardır. Direk yttria takviyeli zirkonya tozu ile kaplanmış numunenin mikroyapı incelemesi sonucu, silindir gömleği malzemesinin gri dökme demir olduğu gözlenmiştir (Şekil 8 d.). Bu şekil üzerinde yukarıdan başlamak üzere, koyu tabaka numunenin parlatma işlemi sırasında sabitlenmesini sağlayan reçine, orta açık renkli bölüm zirkonya (TBC) tabakası, en alt tabaka ise motor bloğunun ana yapısını

teşkil eden gri dökme demirdir. Alt tabakada gözlenen siyah şeritler birikmiş grafit kitleleri olmaktadır, geriye kalan açık renkli kısım yüksek karbon içerikli demirdir. Gri grafit lamellerinin yumuşak doğası nedeniyle motorun titreşimini absorblayıcı özelliği vardır. Şekil 8e ve Şekil 8f, direk kaplamalı ve bağlayıcı kullanarak yapılan kaplamaların kalınlıklarını vermektedir. Buna göre kaplama kalınlıkları üniform bir dağılım göstermemektedir; ve hem ara kaplama yapılmış numunede ve hem de direk kaplanmış numunede yaklaşık 100-120 mikron değerleri ölçülmüştür. Son olarak Instron Universal Tester cihazıyla yapılmış üç farklı noktadan alınmış sertlik ölçme

değerleri Tablo 3 de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, kaplanmış numunelerin sertlik değerleri doğal olarak kaplanmamış numuneye göre yaklaşık 10 HRB (Rockwell B sertlik değeri) daha fazladır.

Düşük ısı kayıplı motor olarak tanımladığımız seramik kaplı motorların dizaynı için, aşağıdaki ilkeler ışığında hareket edilmesi, daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

- Uygun kaplama kalınlığının tayini,
- Yanma yüzeylerinin kaplanması,
- Güvenilirliğin sağlanması,
- Tasarım karmaşıklığının minimize edilmesi,

Tablo 3: Kaplanmış ve Kaplanmamış Numunenin Sertlik Değerleri

Tablo 3: Hardness Values of Coated and Uncoated Specimen

Numune Sample	1. Nokta (HRB) Point 1 (HRB)	2. Nokta (HRB) Point 2 (HRB)	3. Nokta (HRB) Point3 (HRB)	Ortalama Average	Standart Sapma (+ -) Standard Deviation (+-)
Kaplama işlemi öncesi Before Coating Process	86.7	86	85.1	85.93	0.802
Kaplama işlemi sonrası After Coating Process	94	94.8	97.2	95.33	1.665

Figures 8 a and c show the cylinder sleeve and the pieces cut out of its top segment. After being fixed using clamps, pieces were coated using plasma spray technique as shown in Figure 8 b. As a result of the microstructural analysis of the specimen coated by direct yttria reinforced zirconia powder, it was concluded that the cylinder sleeve was made of gray cast iron (Figure 8 d). On this Figure, from top to bottom, the dark layer is the resin used for fixation of the specimen during the polishing process, the middle light colored section is the zir-

conia (TBC) layer and the lower layer is gray cast iron constituting the body of the engine block. The black strips observed here are graphite mass deposits. The remaining light colored section shows high carbon steel. Gray graphite lamels help absorption of the vibration of the engine due to their softness. Figure 8e and Figure 8f give the thicknesses of the coatings applied directly and by using binders. Here, coating thicknesses do not display a uniform distribution. Approximately 100-120 micron figures were read both on the specimen with binder

coating and also the specimen which was coated directly. Lastly, the hardness values taken at three different points by Instron Universal Tester are given in Figure 3. Acting in light of the principles below in designing ceramic coated engines we call low heat loss engines will allow better results to be achieved.

- Determining the appropriate coating thickness,
- Coating of combustion surfaces,
- Ensuring reliability,
- Minimization of design

- e) Uzun süre dayanıklılık,
- f) Bağımsız soğutma,
- g) Yüksek alaşım çeliklerinden kaçınmak,
- h) Motor tasarım değişikliklerini minimize etmek,
- i) Motor performansının artırılması.

Bu ilkelerden sonra aşağıdaki gibi bir strateji belirlenebilir³

- a) Yanma yüzeylerini kaplamak,
- b) Seramik kaplama kullanmak,
- c) Yüksek termal genleşme özelliğine sahip seramik kullanmak,
- d) Seramik-metal uyumunu sağlamak,
- e) Kullanılan yapısal metallerin deformasyonunu önlemek,
- f) Kullanılan yanma odasının deformasyonunu önlemek ve kaplamayı korumak

Yukarıda sayılan kriterler uygulandığı zaman termal kaplamaların başlıca avantajları

- a. Malzeme sıcaklığını yaklaşık 100-110 °C azaltması,
- b. Tepki/ağırlık oranında % 5 lik artış sağlaması,
- c. Yakıt tüketiminin %1 civarında azalması,
- d. % 1 lik verim artmasına tekabül eden \$53938/yıllık tasarruf sağlanması,
- e. Daha iyi kalite de yakıt emisyonu
- f. Çalışan metal aksamdaki sıcaklık düşmesine bağlı olarak soğutucu kompresörün daha küçük boyutta olması veya düşük kapasitede çalışması,
- g. Parça ömründeki artış şeklinde öngörülebilir.

- confusion,
- e) Long lasting strength,
- f) Independent cooling,
- g) Avoiding high allow steels,
- h) Minimization of engine design revisions,
- i) Increasing engine performance.

A strategy similar to the following may be adopted based on these principles³:

- a) Coating of combustion surfaces,
- b) Using ceramic coating,
- c) Using ceramic with high thermal expansion property,
- d) Ensuring ceramic-metal compatibility,
- e) Prevention of deformation of used structural metals,
- f) Prevention of deformation of used combustion chamber and protecting the coating.

Main advantages of thermal coatings when the above listed criteria are applied

- a. Approximate decrease of 100-110 oC of material temperature,
- b. Increase of 5 % on reaction/mass ratio,
- c. Decrease of about 1 % in fuel consumption,
- d. Annual savings of \$53938, representing an efficiency increase of 1 %,
- e. Better quality fuel emission,
- f. Cooling compressor is of smaller size or runs at lower capacity due to the temperature drop in working metal components,
- g. Increase in the life of parts.

Teşekkür

Bu çalışmada, parça temini ve deneylerin yapılmasında bizlere olanak sağlayan ve yardımcı olan Metal Teknisyeni Sayın Bayram Ulubaş'a, Kobatek Firması Sistem Geliştirme ve Yönetim Müdürü Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Sayın Çiğdem Canbatur'a, üretimden sorumlu mühendis Sayın Yılmaz Çelik'e, Marmara Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğr. Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Faik Oktar'a, elektron mikroskobu sorumlusu Sayın Prof. Dr. Gürcan Oraltay ve teknisyen Sayın Mustafa İlhan'a, asistan öğrencilerimiz Sayın İsmail Topçu ve Özgür Çınar'a teşekkürlerimizi sunarız.

Expression of gratitude

We would like to give our thanks to Metal Technician Mr. Bayram Ulubaş, Firm Kobatek System Development and Administration Manager Metallurgical and Materials Engineer M.Sc. Ms Çiğdem Canbatur; Mr. Yılmaz Çelik, Engineer in charge of Production; Asst. Prof. Dr. Faik Oktar, Member of Faculty, Marmara University Industrial Engineering Department; electron microscope officer Prof. Dr. Gürcan Oraltay and technician Mr. Mustafa İlhan and our assistant students Mr. İsmail Topçu and Mr. Özgür Çınar, who assisted us in the carrying out of part procurement and tests and who made this study possible.

Kaynaklar - Bibliography

1. Internet sitesi: <http://www.engr.ku.edu>
2. O. Borat, M. Balci, A. Sürmen "İçten Yanmalı Motorlar", İstanbul-Ankara-Bursa,1994,
3. Internet sitesi: <http://auto.howstuffworks.com/engine.htm>
4. Internet sitesi: <http://auto.howstuffworks.com/diesel.htm>, http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine#Types_of_diesel_engines
<http://www.shermanlab.com/xmwang/myGUI/DieselG.html>
5. Internet sitesi: <http://www.keveney.com/Wankel.html>
6. Internet sitesi: <http://science.howstuffworks.com/turbine3.htm>
7. A. Topal , "Alüminyum Alaşım Piston Malzemelerin Seramik Kaplanması ile Peformans Artırılması", Marmara Üniversitesi,İstanbul,2002,
8. Hardenberg, Horst O., The Middle Ages of the Internal combustion Engine, Society of Automotive Engineers (SAE), 1999
9. Singer, Charles Joseph; Raper, Richard, A history of technology : The Internal Combustion Engine, edited by Charles Singer ... [et al.], Clarendon Press, 1954-1978. pp.157-176[1],
10. Internet sitesi, <http://www.dynacer.com>